

Research Paper

مقاله پژوهشی

Investigation of Effective Parameters in the Combined System of Microstrainer and Ozonation in the Removal of Algae from Raw Water

بررسی پارامترهای موثر در سیستم تلفیقی میکرواسترینر و ازن زنی در حذف جلبک از آب خام

Mohsen Sattari¹ and Daryoush Yousefi Kebria^{2*}

محسن ستاری^۱ و داریوش یوسفی کبری^{۲*}

1- MSc. Student, Department of Civil-Environmental Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

2- Associate Professor, Department of Civil-Environmental Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

۲- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

*Corresponding Author, Email: dy.kebria@nit.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: dy.kebria@nit.ac.ir

Received: 19/10/2021

Revised: 03/06/2022

Accepted: 21/06/2022

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

The presence of algae in the water treatment process is problematic. The best way to control algae is to remove the algae cell intact without rupturing the cell, as most common methods cause disinfection by-products, which are often very dangerous. The aim of this study was to evaluate the efficiency of microstrainer and ozonation systems in combined removal of algae from raw water. For this purpose, Box-Behnken Design was used in the Response Surface Methodology by Design Expert software. Experimental variables included input turbidity (50-150 NTU), microstrainer surface load (10.8-18 m/h) and injectable ozone dose (1-3 mg/L). Based on the experimental conditions, the algae removal efficiency in the integrated microstrainer and ozonation system was 39.64-88.76%. The parameters of inlet water turbidity, injected ozone dose and microstrainer surface load with effect coefficients of 15.37, 8.98 and 4.01, respectively, had the greatest effect on system efficiency in algae removal. Increasing the turbidity and surface load of the microstrainer decreased the algal removal efficiency and increased the injection ozone dose increased the efficiency. The final model based on the desired parameters was obtained as a quadratic equation with correlation coefficient, modified correlation coefficient and predicted correlation coefficient equal to 0.948, 0.928 and 0.868, respectively.

حضور جلبک‌ها در فرآیند تصفیه آب، مشکل آفرین است. بهترین روش برای کنترل جلبک‌ها، حذف سلول جلبک به صورت دست نخورده و بدون پارگی سلول است زیرا بیشتر روش‌های معمول، موجب تشکیل فرآورده‌های جانبی گندزدایی که غالباً بسیار خطرناک هستند، می‌شوند. هدف از این مطالعه بررسی کارایی سیستم‌های میکرواسترینر و ازن زنی به صورت تلفیقی در حذف جلبک از آب خام است. برای این منظور، از طراحی باکس-بنکن در روش سطح پاسخ به وسیله نرم‌افزار Design Expert استفاده شد. متغیرهای آزمایش، شامل کدورت ورودی (NTU) ۵۰-۱۵۰، بار سطحی میکرواسترینر (۱۰/۸-۱۸ متر بر ساعت) و دُز ازن تزریقی (۱-۳ میلی‌گرم بر لیتر) بودند. براساس شرایط آزمایش، راندمان حذف جلبکی در سیستم تلفیقی میکرواسترینر و ازن زنی از ۳۹/۶۴ تا ۸۸/۷۶ درصد، حاصل شد. پارامترهای کدورت آب ورودی، دُز ازن تزریقی و بار سطحی میکرواسترینر به ترتیب با ضرایب اثر ۱۵/۳۷، ۸/۹۸ و ۴/۰۱ بیشترین تأثیر را بر کارایی سیستم در حذف جلبک داشتند. افزایش کدورت و بار سطحی میکرواسترینر سبب کاهش راندمان حذف جلبک و افزایش دُز ازن تزریقی سبب افزایش راندمان شد. مدل نهایی براساس پارامترهای مورد نظر، به صورت یک معادله درجه دو با ضریب همبستگی، ضریب همبستگی اصلاح شده و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده به ترتیب برابر با ۰/۹۴۸، ۰/۹۲۸ و ۰/۸۶۸ به دست آمد.

Keywords: Algae, Box-Behnken Design, Microstrainer, Ozonation, Raw water, Response Surface Methodology.

کلمات کلیدی: میکرواسترینر، ازن زنی، جلبک، آب خام، روش سطح پاسخ، طراحی باکس-بنکن.

این تحقیق، محققین اثر مقدار جریان الکتریکی آب را روی آب دریاچه Falls با روش آزمایشگاهی کشت جلبک سبز-آبی در غلظت تقریبی اولیه‌ای از ۱۰۰۰۰ سلول در هر میلی‌لیتر تا ۵۰۰۰۰ سلول در میلی‌لیتر ارزیابی کردند. میزان تزریق منعقدکننده سولفات آهن III مورد نیاز برای رسیدن به نقطه بار الکتریکی صفر در غلظت ۱۰۰۰۰ سلول جلبک در هر میلی‌لیتر، معادل ۸۵ mg/l سولفات آهن III و برای ۵۰۰۰۰ سلول در هر میلی‌لیتر، معادل ۹۵ mg/l بود. در نقطه بار صفر و با افزودن یک کمک منعقدکننده آنیونی، جلبک در هر دو غلظت اولیه، به‌طور کامل حذف شد. از پوشش برکه می‌توان برای کنترل رشد جلبک‌ها در منابع کوچک نظیر مخازن تهنشینی مقدماتی استفاده کرد. در این روش کنترل، پوشش به میزان زیادی مقدار نور مورد نیاز جلبک‌ها برای فتوسنتز را کاهش می‌دهد. معمولاً از پوشش پلاستیکی مصنوعی شناور استفاده می‌شود (تکدستان و همکاران، ۱۳۸۵).

میکرواسترینر که در بعضی از منابع غربال ریزچشمه (Fine Screen) و یا صافی ریز چشمه سیمی (Fine wire Strainer) نیز نامیده می‌شود (Hazen et al., 1953)، دارای دو نوع؛ درام فیلتر و دیسک فیلتر هستند. میکرواسترینرها امروزه کاربردهای بسیار وسیعی در تصفیه آب برای جداسازی انواع فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌ها و سایر ذرات معلق و همچنین در تصفیه فاضلاب برای شفاف‌سازی و زلال‌سازی آب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، دارند. میکرواسترینر از نوع درام معمولاً با مش‌های فلزی ریز به اندازه ۵ تا ۳۵ میکرومتر ساخته می‌شود. درام‌ها معمولاً در ۷۵ درصد قطر مستغرق (حدود ۶۶ درصد مساحت) و با سرعت ۰/۵ تا ۵ دور در دقیقه^۴ در گردش هستند. البته سرعت چرخش درام می‌تواند براساس بهینه تلفات هد تنظیم شود زیرا در این صورت بهترین درصد حذف و به تبع آن کیفیت آب خام بهتر، بدست خواهد آمد (Ratnayaka et al., 2009).

معمولاً از میکرواسترینر درام برای شفاف‌سازی و زلال‌سازی آب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، استخرهای پرورش ماهی، برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های برق حرارتی، استفاده مجدد از پساب حاصله از شستشوی فیلترها، پیش تصفیه فرآیند آسمز معکوس و کارهای صنعتی استفاده می‌شود (Rimer 1973; Middlebrooks et al., 1974; Kraanand Ghadouani, 2017). اما در تصفیه‌خانه‌های آب معمولاً پس از شیرآلات ورودی از میکرواسترینر دیسکی برای تصفیه اولیه آب خام (جداسازی مواد بیولوژیکی و ذرات معلق) استفاده می‌شود.

در زمینه بررسی تأثیر استفاده از میکرواسترینر بر عملکرد

حضور جلبک‌ها در فرآیند تصفیه آب، مسائل فراوانی مانند؛ بو، طعم، اختلال در انعقاد و تهنشینی، گرفتگی فیلترها و مشکلات بهره‌برداری در شبکه توزیع آب را به‌وجود می‌آورد. امروزه در تصفیه‌خانه‌های آب برای کاهش جلبک ورودی، استفاده از واحد پیش‌اکسیداسیون رایج است. بیشتر مواد اکسیدکننده‌ای مصرفی، مخصوصاً کلر، موجب تشکیل فرآورده‌های جانبی گندزدایی که غالباً بسیار خطرناک هستند، می‌شوند در حالی که بهترین روش برای کنترل جلبک‌ها، حذف سلول جلبک به‌صورت دست‌نخورده و بدون پارگی سلول است. برای تحقق این امر در حذف جلبک، استفاده از روش‌های بیولوژیکی و فیزیکی توصیه شده است (Matter et al., 2019). برای حذف جلبک‌ها و مواد آلی معلق راه‌کارهای مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین این موارد استفاده از میکرواسترینر است. استفاده از میکرواسترینر با چشمه‌های بسیار ریز از لحاظ هزینه‌های زیاد اجرایی و مسائل بهره‌برداری با مشکلاتی چون؛ گرفتگی و مصرف زیاد آب برای شستشوی معکوس مواجه هست لذا این فیلترها به تنهایی نمی‌توانند تمامی جلبک‌ها و مواد آلی ریز موجود در آب را به‌صورت فیزیکی حذف نمایند. در نتیجه استفاده از مواد اکسیدکننده برای حذف جلبک‌ها و مواد آلی، راهکاری دیگر قلمداد می‌شود. یکی از اهداف قانون آب آشامیدنی سالم^۱ در تصفیه آب خام برای شرب، به حداقل رساندن شرایط برای تشکیل فرآورده‌های جانبی گندزدایی^۲ است (Smith, 1991). از بهترین راه‌ها برای این کار، حذف یا کاهش فیزیکی مواد پیش‌ساز قبل از گندزدایی است (Clark and Summers, 1993). از آنجایی که مواد پیش‌ساز غالباً دارای چگالی کمتر از ۱ هستند لذا حذف آن‌ها در استخرهای تهنشینی اولیه و ثانویه به فضا و زمان زیادی احتیاج دارد. برای رفع این دو مشکل می‌توان از میکرواسترینر استفاده کرد زیرا به فضای کمی برای احداث و همچنین زمان کمتری برای صاف‌سازی نیاز دارند (عبداله‌پور و همکاران، ۱۳۹۳).

علاوه بر میکرواسترینر برای حذف جلبک، روش‌های گوناگون دیگری از جمله: فیلتر مستقیم، تهنشینی، شناورسازی^۳، فیلتر غشایی، اکسیداسیون پیشرفته، سیستم تلفیقی از زنی و کربن فعال گرانولی و ... مورد توجه قرار گرفته‌اند (Mouchet and Abrha et al., 2018; Liu et al., 2015; Piontek and Czyzewska, 2012; Dong and Huo, 2021). Briley et al. (2002) میزان تزریق سولفات آهن را به‌عنوان ماده منعقدکننده برای حذف جلبک‌های سبز-آبی در تصفیه‌خانه آب، بهینه‌سازی کردند. در

به‌صورت موازی است، میکرواسکریئر، ازن‌زنی، تزریق مواد شیمیایی، هم‌زن سریع (اختلاط‌تند)، لخته‌سازی (اختلاط‌کند)، ته‌نشینی و زلال‌سازی، فیلتراسیون شنی، گندزدایی (کلرزنی)، ذخیره‌سازی. در این تصفیه‌خانه آب دو دستگاه میکرواسترینر از نوع دیسک فیلتر با قطر منافذ ۲۰ میکرون قرار دارد که یکی در حال کار و دیگری در حالت آماده به کار، است. در حالت فیلتراسیون، فیلترها ثابت بوده و در حالت بک‌واش می‌چرخند. در نتیجه در حالت فیلتراسیون حداکثر ۵۰ درصد سطح فیلترها در تماس با آب است. بک‌واش دستگاه به‌صورت اتوماتیک و زمانی که اختلاف ارتفاع آب داخل و خارج فیلتر که نشان‌دهنده افت فشار فیلتر است، به حد تعیین‌شده‌ای برسد، انجام می‌شود. سیستم ازن‌زنی این تصفیه‌خانه با ظرفیت ۴+۲ کیلوگرم بر ساعت طراحی و اجرا شده است. در این سیستم، برای افزایش راندمان تولید ازن، ابتدا اکسیژن با خلوص بالای ۹۵ درصد در سیستم اکسیژن‌ساز تولید می‌شود. اکسیژن‌ساز، شامل مراحل کمپرسور هوای ورودی، رطوبت‌گیری تبریدی و جداساز (خالص‌ساز) ژئولیتی است. اکسیژن تولیدشده در این مرحله به سیستم تولید ازن که از طریق تخلیه کرونا پالسی در محفظه رآکتور ازن تولید می‌کند، وارد می‌شود. حداکثر ۷ درصد اکسیژن ورودی به ازن تبدیل می‌شود. ازن تولیدشده در حوضچه‌ای مسقف از طریق دیفیوزرهایی که در کف حوضچه تعبیه‌شده به داخل جریان آب تزریق می‌شود. راندمان سیستم تزریق ازن حداکثر ۷۰ درصد است. ازن اضافی که از جریان آب خارج می‌شود، توسط اسکرابری که بر روی سقف حوضچه نصب شده است، با رساندن دمای آن به حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه‌شده و از بین می‌رود.

۲-۲- روش انجام کار

در این تحقیق، عملکرد تلفیقی سیستم میکرواسترینر و ازن به‌طور هم‌زمان در حذف جلبک‌های ورودی به تصفیه‌خانه آب مورد مطالعه، در قالب روش طراحی آزمایش باکس-بنکن و با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 7.0.0 Trial انجام شد. روش سطح پاسخ^۶ در این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی آماری است که با استفاده از کمترین تعداد آزمایش‌های تجربی و براساس طراحی آزمایش باکس-بنکن، اجرا می‌شود (Cojocararu and Zakrzewska, 2007). طراحی آزمایش به روش طراحی باکس-بنکن، به دسته‌ای از طراحی‌ها اطلاق می‌شود که تنها سه سطح را برای هر فاکتور در نظر می‌گیرند. در این نوع طراحی تعداد آزمایش‌ها به‌طرز مناسبی کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه در مواقعی که انجام آزمایش‌ها نیازمند صرف وقت و هزینه بالا است،

کلی تصفیه‌خانه آب، تحقیقاتی که معمولاً مربوط به چندین دهه قبل هستند، انجام شده است. از نتایج این تحقیقات می‌توان به راندمان بالاتر حذف جلبک، کاهش دُز مصرفی ماده اکسیدکننده برای تصفیه آب، هزینه‌های اولیه کم، نیاز به فضای کوچک، کاهش کلی افت هیدرولیکی، کاهش میکروسیستین‌های داخل سلولی و ... اشاره نمود (Czyzewska and Piontek, 2019; Parabrahmam et al., 1968; Albert and Beryr, 1961; Deyab et al., 2015). درباره بررسی ماده اکسیدکننده در حذف جلبک تحقیقات گسترده‌ای صورت پذیرفته است. معمولاً در این تحقیقات اثر یک ماده اکسیدکننده خاص و یا مقایسه دو یا چند ماده اکسیدکننده در حذف جلبک مد نظر قرار گرفته است (Xie et al., 2013; Chen et al., 2009; Plummer And Edzwald, 2001; Ma and Liu, 2002; Shen et al., 2011; Chen and Yeh, 2005).

طبق بررسی‌های انجام شده، کار تحقیقاتی و سوابق علمی زیادی در زمینه پارامترهای موثر بر عملکرد میکرواسترینر در حذف جلبک انجام نشده است. در مقالات و کارهای علمی انجام شده که در بالا به آن‌ها اشاره شد معمولاً به‌صورت موردی، تأثیر میکرواسترینر بر کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی کلی سیستم تصفیه آب خام، کاهش مشکلات بهره‌برداری و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه استفاده از مواد اکسیدکننده نیز معمولاً اثر آن‌ها بدون در نظر گرفتن سایر پارامترهای موثر مانند کدورت مورد تحقیق قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق سیستم تلفیقی حذف جلبک بوسیله میکرواسترینر و ازن‌زنی و پارامترهای موثر در آن‌ها مانند؛ کدورت، دُز ازن تزریقی و بار سطحی میکرواسترینر، مورد بررسی قرار گرفت. برای کاهش تعداد نمونه‌ها، از طراحی آزمایش باکس-بنکن^۵، در روش سطح پاسخ استفاده شد. بررسی و تحلیل داده‌ها بوسیله نرم‌افزار Design Expert 7.0.0 Trial انجام شد.

۲-۱- مشخصات تصفیه‌خانه آب مورد مطالعه

تصفیه‌خانه آب مورد مطالعه با ظرفیت ۴۱۰ لیتر در ثانیه در سال ۱۳۹۵ به بهره‌برداری رسیده است. خط انتقال حدود ۲/۲ کیلومتر از منبع تامین آب (مخزن سد) تا تصفیه‌خانه آب و حدود ۱۶ کیلومتر تا اولین مخزن ذخیره تامین آب شبکه توزیع است. فرآیند تصفیه در تصفیه‌خانه آب مورد مطالعه به‌شرح زیر طراحی و اجرا شده است: دو آشغالگیر دستی و مکانیکی تعبیه شده که

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (2)$$

که N : تعداد آزمایش‌های لازم برای توسعه طراحی آزمایش باکس-بنکن، k : تعداد پارامترها و C_0 : تعداد نقاط مرکزی هستند. از آنجایی که تعداد متغیرهای مستقل در این تحقیق ۳ مورد شامل؛ کدورت ورودی، بار سطحی میکرواسترینر و ازن تزریقی است و با انتخاب عدد ۳ برای نقاط مرکزی، براساس رابطه (۲) تعداد آزمایش‌های لازم ۱۵ مورد خواهد بود. ترتیب انجام آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار به صورت اتفاقی منظم شده است. در تمامی آزمایش‌ها pH ورودی در محدوده $8/17 \pm 0/05$ و دما در محدوده 12 ± 4 متغیر بود. در حالی که در طول فرایند، تغییری در مقادیر این پارامترها رخ نداد.

۳- نتایج و بحث

پس از نمونه‌برداری و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه، آنالیز نتایج راندمان حذف جلبک در ورودی و خروجی سیستم حذف جلبک شامل میکرواسترینر و ازن، به شرح جدول ۲ حاصل شد. با توجه به نتایج به دست آمده از سیستم طراحی شده، مشاهده می‌شود که براساس شرایط آزمایش، راندمان حذف جلبکی در سیستم تلفیقی میکرواسترینر و ازن زنی از $39/64$ تا $88/76$ درصد، حاصل شد. برای بررسی عملکرد سیستم میکرواسترینر به تنهایی، نمونه‌های در کدورت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ NTU و بارهای سطحی $1/8$ ، $14/4$ و ۱۸ متر بر ساعت برداشت شده و آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج بررسی راندمان حذف جلبک‌ها به تنهایی بوسیله میکرواسترینر از ۲۲ درصد (برای کدورت و دبی حداکثر) تا ۵۵ درصد (برای کدورت و دبی حداقل) و در همین شرایط نمونه‌ها، برای سیستم ازن زنی به تنهایی، در کدورت حداقل و دُز تزریقی حداکثر، حذف جلبک $99/36$ درصد و برای کدورت حداکثر و دُز تزریقی حداقل، حذف جلبک $53/28$ درصد به دست آمده است.

به منظور مدل‌سازی داده‌ها و تعیین پارامترهای مؤثر در فرآیند حذف جلبک توسط سیستمی متشکل از میکرواسترینر و ازن زنی، از برازش مدل چند جمله‌ای درجه دوم کامل برحسب متغیرهای کدورت، بار سطحی میکرواسترینر و دُز ازن تزریقی، بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. اطلاعات در نرم‌افزار Design Expert 7.0.0 Trial قسمت مربوط به روش‌های سطح پاسخ، طراحی آزمایش باکس-بنکن، وارد شده سپس آنالیز واریانس بر برازش معادله انجام که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

بسیار مناسب است. مقایسه بین طراحی‌های باکس-بنکن و سایر طراحی‌های سطح پاسخ (طراحی مرکب مرکزی و یا فاکتوریل کامل) نشان می‌دهد که این روش از هر دو روش طراحی مرکب مرکزی و فاکتوریل کامل، بسیار کارآمدتر است (Ferreira et al., 2007). با استفاده از نرم‌افزار، ابتدا مدل‌سازی نتایج آزمایش برحسب متغیرهای اصلی و با استفاده از معادله درجه دوم کامل انجام و معنادار بودن ضرایب و پارامترهای معادله به روش آنالیز واریانس^۷ تعیین شد. همچنین ضریب همبستگی و درصد خطای نسبی رگرسیون معادله نهایی محاسبه شد. پس از طراحی آزمایش مطابق فرمت نرم‌افزار، شرایط سیستم براساس طراحی آزمایش تنظیم و نمونه‌های خروجی برای آنالیز تهیه و به آزمایشگاه ارسال شد. متغیرهای آزمایش، شامل کدورت ورودی (۵۰-۱۵۰ NTU)، بار سطحی میکرواسترینر (۱/۸-۱۸ متر بر ساعت) و دُز ازن تزریقی (۱-۳ میلی‌گرم بر لیتر) بودند (جدول ۱).

جدول ۱- متغیرها و سطح تغییرات

متغیر	نشانه	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
			-۱	۰	+۱
کدورت ورودی	Tur	NTU	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
بار سطحی میکرواسترینر	Ls	m/h	۱۰/۸	۱۴/۴	۱۸
دُز ازن تزریقی	O3	mg/l	۱	۲	۳

یکی از پارامترهای مهم می‌توانست بار جلبکی ورودی باشد، که به دلیل عدم امکان کنترل و تنظیم بار جلبکی، این پارامتر در طراحی آزمایش وارد نشد. هم‌چنین با توجه به محدودیت تزریق ازن و اطمینان از تزریق میزان کافی ازن (حداکثر تا ۳ میلی‌گرم بر لیتر)، دبی ورودی به تصفیه‌خانه آب مورد مطالعه براساس محاسبات در محدوده ۱۵۰-۲۵۰ لیتر بر ثانیه تنظیم شد (رابطه (۱)).

$$Dose O_3 (mg/l) = \frac{C \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3600 s} \times 10^6 \frac{mg}{kg} \times \eta}{Q \frac{l}{s}} \quad (1)$$

که C : ظرفیت تزریق ازن (کیلوگرم بر ساعت)، η : بازده سیستم تزریق ازن و Q : دبی آب ورودی به تصفیه‌خانه آب (لیتر بر ثانیه) هستند.

تعداد آزمایش‌های لازم برای توسعه طراحی آزمایش باکس-بنکن از رابطه (۲) به دست می‌آید (قربانی و باقریان، ۱۳۹۵):

بررسی پارامترهای موثر در سیستم تلفیقی میکرواسترینر و ازن‌زنی در حذف جلبک از آب خام

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها براساس طراحی آزمایش باکس-بنکن در سیستم تلفیقی میکرواسترینر و ازن‌زنی

شماره آزمایش	پارامتر ۱	پارامتر ۳	پارامتر ۲	تعداد جلبک		پاسخ
				خروجی	ورودی	
				A:Tur NTU	C:Ls m/h	
۱	۱۰۰	۱۸	۱	۲۳۹	۳۹۶	۳۹/۶۴
۲	۱۰۰	۱۴/۴	۲	۱۷۸	۳۹۶	۵۵/۱۵
۳	۱۵۰	۱۴/۴	۱	۲۳۰	۳۴۵	۳۳/۳۱
۴	۱۵۰	۱۰/۸	۲	۱۷۸	۳۴۵	۴۸/۴۵
۵	۱۵۰	۱۸	۲	۲۰۴	۳۴۵	۴۰/۸۰
۶	۵۰	۱۴/۴	۱	۱۸۱	۴۳۳	۵۸/۲۹
۷	۱۰۰	۱۴/۴	۲	۱۸۴	۳۹۶	۵۳/۶۴
۸	۱۰۰	۱۰/۸	۱	۱۹۳	۳۹۶	۵۱/۲۵
۹	۵۰	۱۴/۴	۳	۴۹	۴۳۳	۸۸/۷۶
۱۰	۱۰۰	۱۴/۴	۲	۱۷۹	۳۹۶	۵۴/۹۲
۱۱	۵۰	۱۸	۲	۱۱۹	۴۳۳	۷۲/۴۵
۱۲	۵۰	۱۰/۸	۲	۱۰۷	۴۳۳	۷۵/۲۹
۱۳	۱۰۰	۱۸	۳	۱۸۵	۳۹۶	۵۳/۱۸
۱۴	۱۵۰	۱۴/۴	۳	۱۷۵	۳۴۵	۴۹/۲۸
۱۵	۱۰۰	۱۰/۸	۳	۱۴۶	۳۹۶	۶۳/۱۵

جدول ۳- رگرسیون و آنالیز واریانس نتایج آزمایش‌ها براساس معادله چندجمله‌ای کامل

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار f	مقدار p
مدل	۲۸۵۳/۷۱۲	۹	۳۱۷/۰۷۹۱	۲۰/۸۴۷۹	۰/۰۰۱۹
A-O3	۶۴۵/۸۴۱۸	۱	۶۴۵/۸۴۱۸	۴۹/۴۶۳۹	۰/۰۰۱۳
B-Ls	۱۲۸/۵۶۰۶	۱	۱۲۸/۵۶۰۶	۸/۴۵۲۸	۰/۰۳۳۵
C-Tur	۱۸۸۹/۵۸۸	۱	۱۸۸۹/۵۸۸	۱۲۴/۲۴	۰/۰۰۱
AB	۰/۶۷۲۴	۱	۰/۶۷۲۴	۰/۰۴۴۲	۰/۸۴۱۸
AC	۵۲/۵۶۲۵	۱	۵۲/۵۶۲۵	۳/۴۵۵۹	۰/۱۲۲۱
BC	۵/۷۸۴۰	۱	۵/۷۸۴۰	۰/۳۸۰۳	۰/۵۶۴۴
A ²	۱۵/۵۱۰۶	۱	۱۵/۵۱۰۶	۱/۰۱۹۸	۰/۳۵۸۹
B ²	۰/۱۶۶۱	۱	۰/۱۶۶۱	۰/۰۱۰۹	۰/۹۲۰۸
C ²	۱۰۷/۳۸۵۴	۱	۱۰۷/۳۸۵۴	۷/۰۶۰۵	۰/۰۴۵۰
مانده باقی	۷۶/۰۴۵۹	۵	۱۵/۲۰۹۲		
عدم برازش	۷۴/۹۵۳۶	۳	۲۴/۹۸۴۵	۴۵/۷۴۸۰	۰/۰۲۱۵
خطای خام	۱/۰۹۲۲	۲	۰/۵۴۶۱		
کل	۲۹۲۹/۷۵۸	۱۴			

درصد حذف جلبک از آب خام ورودی است، به پارامترهای حاکم (کدورت ورودی، بار سطحی میکرواسترینر و دُز ازن تزریقی) به صورت رابطه (۳) بستگی خواهد داشت.

سپس پارامترهای که مقادیر p-value حاصل از F-test آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ به دست آمده، از معادله برازش شده حذف شد. در نتیجه ضرایب پارامترهای تداخلی AB، AC و BC و پارامترهای منحنی A² و B² از معادله برازش حذف و آنالیز واریانس مجدداً بر مبنای پارامترهای معنادار انجام و پاسخ آزمایش (Y) که همان

نتایج آزمایش‌ها و مقادیر ضرایب همبستگی مدل نهایی ارائه شده است.

$$Y = 103.794 + 8.985O_3 - 1.113L_S - 0.0751Tur - 0.00223Tur^2 \quad (3)$$

در جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب رگرسیون و آنالیز واریانس

جدول ۴- رگرسیون و آنالیز واریانس نتایج آزمایشات براساس مدل نهایی

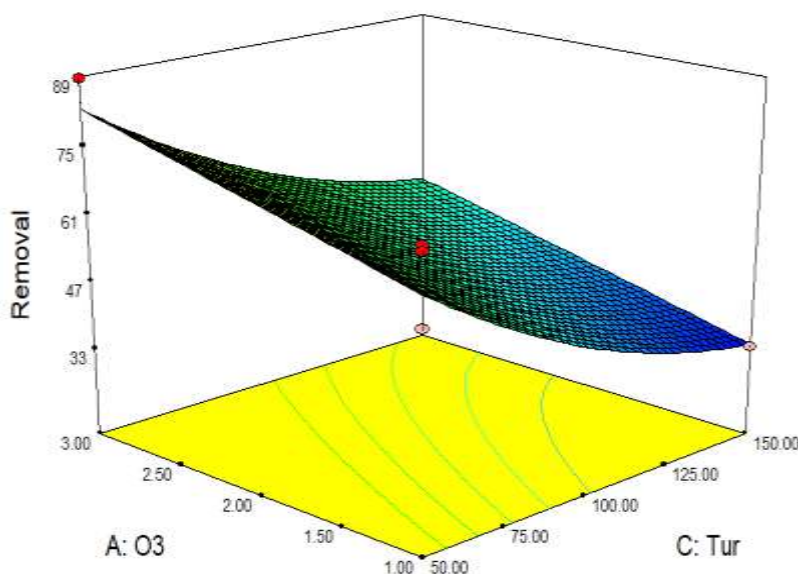
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار f	مقدار p
مدل	۲۷۷۹/۱۷۱۳	۴	۶۹۴/۷۹۲۸	۴۶/۱۳۹۱۳۸	<۰/۰۰۰۱
A-O3	۶۴۵/۸۴۱۸	۱	۶۴۵/۸۴۱۸	۴۲/۸۸۸۴	<۰/۰۰۰۱
B-LS	۱۲۸/۵۶۰۶	۱	۱۲۸/۵۶۰۶	۸/۵۳۷۳	۰/۰۱۵۳
C-Tur	۱۸۸۹/۵۸۷۸	۱	۱۸۸۹/۵۸۷۸	۱۲۵/۴۸۱۹	<۰/۰۰۰۱
C ²	۱۱۵/۱۸۱۰	۱	۱۱۵/۱۸۱۰	۷/۶۴۸۸	۰/۰۱۹۹
باقی مانده	۱۵۰/۵۸۶۴	۱۰	۱۵/۰۵۸۶		
عدم برازش	۱۴۹/۴۹۴۱	۸	۱۸/۶۸۶۷	۳۴/۲۱۶۵	۰/۰۲۸۷
خطای خام	۱/۰۹۲۲	۲	۰۵۴۶۱		
کل	۲۹۲۹/۷۵۷۷	۱۴			

۱/۰۹ درصد و مقادیر ضریب همبستگی (R^2) و ضریب همبستگی اصلاح شده (\bar{R}^2) به ترتیب ۰/۹۴۸ و ۰/۹۲۸ به دست آمد که نشان‌دهنده برازش خوب داده‌های تجربی توسط مدل است. همچنین اختلاف ضریب همبستگی اصلاح شده و پیش‌بینی شده (۰/۸۶۸) کمتر از ۰/۲ است. درصد حذف جلبک براساس اثر تلفیقی پارامترهای مختلف (کدورت و دز ازن تزریقی، کدورت و بار سطحی میکرواسترینر و دز ازن و بار سطحی میکرواسترینر) به صورت سه بعدی به ترتیب در شکل ۱ تا شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر ضرایب همبستگی مدل نهایی

۳/۸۸۰۵	انحراف معیار
۵۵/۷۳۶۶	میانگین
۶/۹۶۲۲	ضریب تغییرات (%)
۳۸۴/۲۴۷۶	باقیمانده پیش‌بینی شده
۰/۹۴۸۶	ضریب همبستگی
۰/۹۲۸۰	ضریب همبستگی اصلاح شده
۰/۸۶۸۸	ضریب همبستگی پیش‌بینی شده
۲۱/۷۴۰۲	دقت کافی

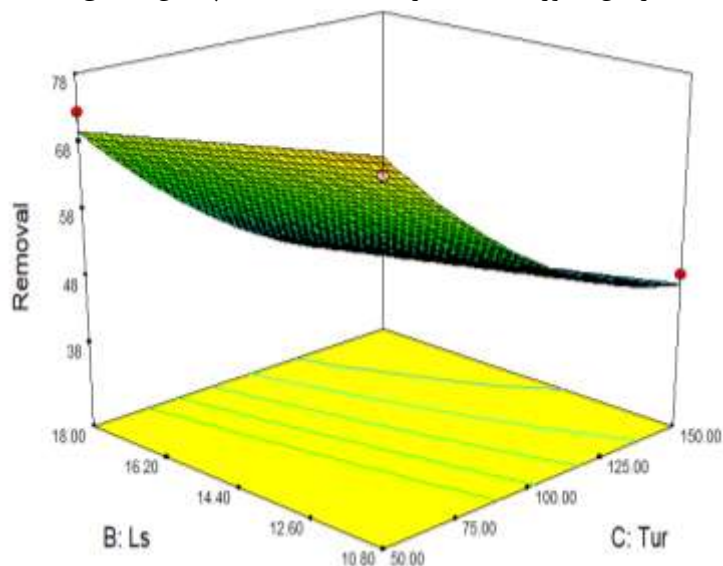
براساس نتایج ارائه شده در جدول‌های ۴ و ۵، خطای برازش،



شکل ۱- درصد حذف جلبک برحسب کدورت و دز ازن تزریقی

عملکرد ازن در حذف جلبک اثر منفی دارد و اثر ازن در کدورت‌های مختلف به‌طور قابل‌توجهی متغیر است که بر تحقیقات پیشین منطبق است.

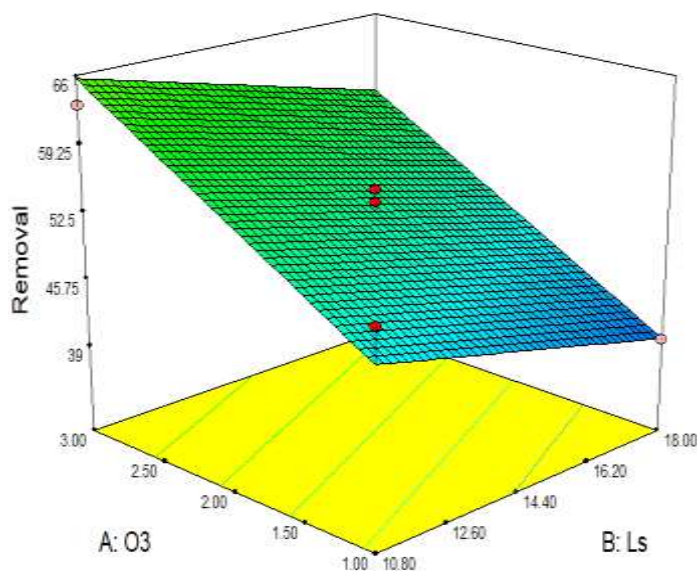
با توجه به شکل ۱ مشخص است که با کاهش کدورت و افزایش دُز ازن، راندمان حذف جلبک به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش کدورت به‌شدت بر



شکل ۲- درصد حذف جلبک بر حسب کدورت و بار سطحی میکرواسترینر

شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش دُز ازن تأثیر بسیار بیشتری نسبت به کاهش بار سطحی میکرواسترینر بر حذف جلبک دارد.

با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که درصد حذف جلبک با افزایش کدورت و بار سطحی میکرواسترینر کاهش می‌یابد و این کاهش بر اثر افزایش راندمان حذف جلبک بسیار چشمگیرتر است.



شکل ۳- درصد حذف جلبک بر حسب دُز ازن و بار سطحی میکرواسترینر

میکرواسترینر در کدورت‌های بالا مکرراً دچار گرفتگی شده و استفاده از آن به‌دلیل نیاز سیستم به بک‌واش‌های مکرر و افزایش استهلاک، عملاً امکان‌پذیر نیست. ازن نیز در کدورت‌های بالا از

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱ تا شکل ۳، می‌توان گفت که سیستم حذف جلبکی در تصفیه‌خانه آب در کدورت‌های بالا (بیشتر از ۱۰۰ NTU) راندمان پایینی در حذف جلبک دارد.

جلبک دارد. برازش معادله خطی بدون بُعد برمبنای متغیرهای گذشته نشان داد که پارامتر کدورت آب ورودی تقریباً دو برابر دُز ازن تزریقی و دُز ازن تزریقی تقریباً دو برابر بار سطحی میکرواسترینر (کدورت آب ورودی تقریباً چهار برابر بار سطحی میکرواسترینر) بر کارایی سیستم در حذف جلبک موثر هستند. از میان این سه پارامتر، افزایش کدورت اولیه آب و افزایش بار سطحی میکرواسترینر سبب کاهش راندمان حذف جلبک و افزایش دُز ازن تزریقی سبب افزایش راندمان حذف جلبک خواهد شد.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Safe Drinking Water Act (SDWA)
- 2- Disinfection by Products (DBPs)
- 3- Dissolved Air Flotation (DAF)
- 4- Revolutions per Minute (RPM)
- 5- Box-Behnken Design (BBD)
- 6- Response Surface Methodology (RSM)
- 7- Analysis of Variance (ANOVA)

۶- مراجع

تکدستان، ا.، جعفرزاده، ن.، و فاخری رئوف، ف.، (۱۳۸۵)، "بررسی مشکلات ناشی از جلبک‌ها در منابع و تصفیه‌خانه آب و روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کنترل آن‌ها"، سومین همایش ملی بحران‌های زیست محیطی ایران و راه‌کارهای بهبود آن‌ها، اهواز.

عبداله‌زاده، م.، صفائی، م.، و سجادی‌پور، ر.، (۱۳۹۳)، "استفاده مجدد پساب شستشوی صافی و افزایش کیفیت آن توسط میکرواسترینر در تصفیه‌خانه‌های آب کشور"، همایش ملی بازیافت آب؛ راهبردی اصولی برای مدیریت بحران آب، تهران.

قربانی، م.، باقریان، ع.، (۱۳۹۵)، "بهینه‌سازی جذب سطحی با روش طراحی آزمایش پاسخ سطح برای رنگ آسترزون آبی توسط رزین کوپلیمر استایرن-دی وینیل بنزن سولفونه شده"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، کرج، (۱)۳۵، ۲۵-۳۷.

Abrha, Y.W., Kye, H., Kwon M., Lee, D., Kim, K., Jung, Y., Ahn, Y., and Kang, J.W., (2018), "Removal of algae, and taste and odor compounds by a combination of Plant-Mineral Composite (PMC) coagulant with UV-AOPs: Laboratory and pilot scale studies", *Applied Science*, 8(9), 1502.

Albert, E., and Berry, G., (1961), "Removal of algae by microstrainers", *American Water Works Association*,

تأثیر بر جلبک‌ها ناتوان است، زیرا ذرات معلق کلوئیدی علاوه بر مصرف ازن، نقش سرپناهی برای جلبک‌ها را ایفا می‌کنند. همچنین می‌توان گفت که در کدورت‌های بالا، عملاً افزایش دُز ازن سبب افزایش راندمان حذف جلبک نشده و تنها هزینه‌ها را افزایش خواهد داد. در کدورت‌های بالا با بهینه‌سازی سیستم انعقاد و لخته‌سازی می‌توان حذف تکمیلی جلبک را انجام داد. برازش معادله نهایی بدون بُعد برمبنای متغیرهای گذشته (۱، ۰، -۱) در رابطه (۴) نشان داده شده است. ضرایب هریک از متغیرها در این معادله، ضریب اثر آن متغیر بر پاسخ نهایی را نشان می‌دهد. ضریب اثر یک متغیر نشان‌دهنده میزان تأثیر آن متغیر بر پاسخ نهایی است، بدین معنا که متغیر با ضریب اثر بالاتر، تأثیر بیشتر آن بر متغیر پاسخ خواهد داشت.

$$Y = 52.77 + 8.98O_3 - 4.01L_S - 15.37Tur - 5.55Tur^2 \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴)، پارامترهای کدورت آب ورودی، دُز ازن تزریقی و بار سطحی میکرواسترینر به ترتیب با ضرایب اثر ۱۵/۳۷، ۸/۹۸ و ۴/۰۱ بیشترین تأثیر را بر کارایی سیستم در حذف جلبک دارند. از میان این سه پارامتر، افزایش کدورت اولیه آب و افزایش بار سطحی میکرواسترینر سبب کاهش راندمان حذف جلبک و افزایش دُز ازن تزریقی سبب افزایش راندمان حذف جلبک خواهد شد. در شرایط عملیاتی، با توجه به اینکه کدورت ورودی قابل تنظیم نیست، با توجه به ضرایب اثر پارامترها می‌توان گفت که در سیستم حذف جلبک موجود، با کاهش دبی ورودی و افزایش دُز ازن تزریقی، بیشترین مقدار حذف جلبک حاصل خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

با بررسی سیستم تلفیقی میکرواسترینر و سیستم ازن‌زنی که براساس روش آزمایش طراحی باکس-بنکن انجام شده است، مشخص شد که با کاهش کدورت و افزایش دُز ازن، راندمان حذف جلبک به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش کدورت به‌شدت بر عملکرد ازن در حذف جلبک اثر منفی دارد و اثر ازن در کدورت‌های مختلف به‌طور قابل‌توجهی متغیر است که بر تحقیقات پیشین منطبق است. درصد حذف جلبک با افزایش کدورت و بار سطحی میکرواسترینر کاهش می‌یابد و این کاهش بر اثر افزایش راندمان حذف جلبک بسیار چشمگیرتر است. همچنین افزایش دُز ازن تأثیر بسیار بیشتری نسبت به کاهش بار سطحی میکرواسترینر بر حذف

- techniques for microalgae: A review”, *Applied Sciences*, 9(15), 3069.
- Montiel, A., and Welte, B., (1998), “Preozonation coupled with flotation filtration: Successful removal of algae”, *Water Science and Technology*, 31(2), 13-65.
- Mouchet, P., and Bonnelye, V., (1998), “Solving algae problems: French expertise and world-wide applications”, *Research and Technology-Aqua, Water Supply*, 47(3), 125-141.
- Parabrahmam, M., Lakshminarayana, J., and Bopardikar, M., (1968), “Application of microstrainer to water treatment at Nagpur (India)”, *Water Research*, 2(3), 225-23.
- Piontek, M., and Czyżewska, W., (2012), “Efficiency of drinking water treatment processes, removal of phytoplankton with special consideration for cyanobacteria and improving physical and chemical parameters”, *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(6), 1797-1805.
- Plummer, J., and Edzwald, J., (2001), “Effect of ozone on algae as precursors for trihalomethane and haloacetic acid production”, *Environmental Science and Technology*, 35(18), 3661-3668.
- Ratnayaka, D.D., Brandt, J., and Johnson, M., (2009), *Water supply*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Chapter 7, 267-314.
- Rimer, A.E., (1973), “Prototype study of microstraining at a paper mill complex”, *Water Pollution Control Federation*, 45(12), 2567-2576.
- Shen, Q., Zhu, J., Cheng, L., Zhang, J., Zhang, Z., and Xu, X., (2011), “Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation”, *Desalination*, 271(1-3), 236-240.
- Smith, J., (1991), *Technologies for upgrading existing or designing new drinking water treatment facilities*, Elsevier Science, Paper 374.
- Xie, P., Ma, J., Fang, J., Guan, Y., Yue, S., Li, X., and Chen, L., (2013), “Comparison of permanganate preoxidation and preozonation on algae containing water: Cell integrity, characteristics, and chlorinated disinfection byproduct formation”, *American Chemical Society, Environmental Science and Technology*, 47(24), 14051-14061.
- 53(12), 1503-1508.
- Briley, D.S., and Knappe, D.R., (2002), “Optimization ferric sulfate coagulation of algae with streaming current measurements”, *Journal of American Water Works Association (AWWA)*, 94(2), 80-90.
- Chen J.J., Yeh, H.H., and Tseng, Ch., (2009), “Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal, pilot and bench scale tests”, *Chemosphere*, 74(6), 840-846.
- Chena, J.J., and Yeh, H.H., (2005), “The mechanisms of potassium permanganate on algae removal”, *Water Research*, 39(18), 4420-4428.
- Clark, R. M., and Summers, R.S., (1993), *Strategies and technologies for meeting SDWA requirements*, CRC Press, 17-28.
- Cojocaru, C., and Zakrzewska-Trznadel, G., (2007), “Response Surface Modeling and Optimization of Copper Removal from Aqua Solutions Using Polymer Assisted Ultrafiltration”, *Membrane Sci*, 298(1-2), 56-70.
- Czyżewska, W., and Piontek, M., (2019), “The efficiency of microstrainers filtration in the process of removing phytoplankton with special consideration of cyanobacteria”, *MDPI, Toxins*, 11(5), 1-13.
- Deyab, M.A., ElAdl, M.F., and ElTantawy, M.E., (2015), “Efficiency assessment of drinking water treatment processes in the removal of phytoplankton at Damietta-Egypt”, *Scientific Journal for Damietta Faculty of Science*, 5(1), 48-61.
- Dong, L., and Huo, M., (2021), “Effective removal of algae from water by Diatomite Enhanced Graphene Oxide Flocculation”, *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(5), 3955-3962.
- Ferreira, S.L.C., Bruns, R.E., Ferreira, H.S., Matos, G.D., David, J.M., Brandão, G.C., Da Silva, E.G.P., Portugal, L.A., Dos Reis, P.S., Souza, A.S., and Dos Santos, W.N.L., (2007), “Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods”, *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179-186.
- Kraan, J., and Ghadouani, A., (2017), “Assessment of screen filters for removal from treated wastewater”, *CEED Seminar Proceedings*, Australia, 79-84.
- Liu, Q., Liu, H., Wu, Sh., and Duan, Z., (2015), “Advanced oxidation processes for the removal of algal cells and cyanotoxins from drinking water”, *2nd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences (IWMECS 2015)*, Atlantis Press, 801-804.
- Ma, J., and Liu, W., (2002), “Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation”, *Water Research*, 36(4), 871-878.
- Middlebrooks, E.J., Porcella, Donald B., Gearheart, Robert A., Marshall, Gary R., Reynolds, James H., and Grenney, William J., (1974), “Review paper: Evaluation of techniques for algae removal from wastewater stabilization ponds”, Reports, Utah Water Research Laboratory, Paper 20
- Matter, I.A., Hoang, V.K.H., Seo, J.Y., Kim, Y.E., Lee, Y.Ch., and Oh, Y.K., (2019), “Flocculation harvesting



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.